



# 第3章 电子器件及其电路模型

## 之1 PN结与二极管

本节主要讨论：

- PN结的简单原理
- 二极管特性与电路模型
- 稳压二极管等特种二极管



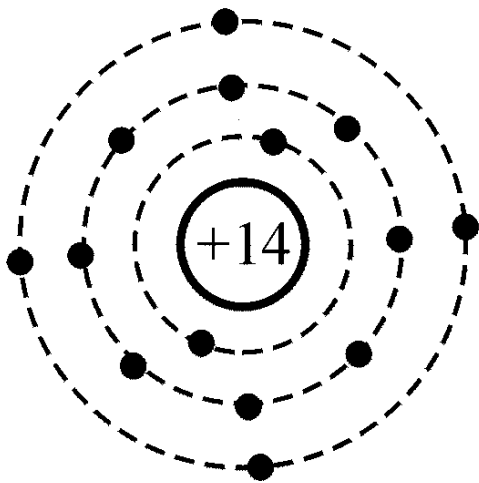
## 3.1 PN结与二极管

### 一、半导体的导电特性

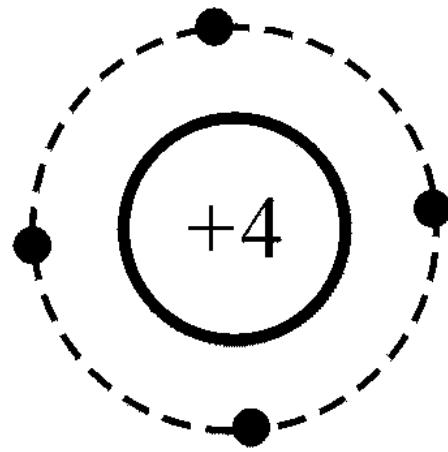
主要有：**Si**（硅） **Ge**（锗） **GaAs**（砷化镓）；

影响半导体的导电性能： 温度、纯度。

#### 1、本征半导体



硅原子结构

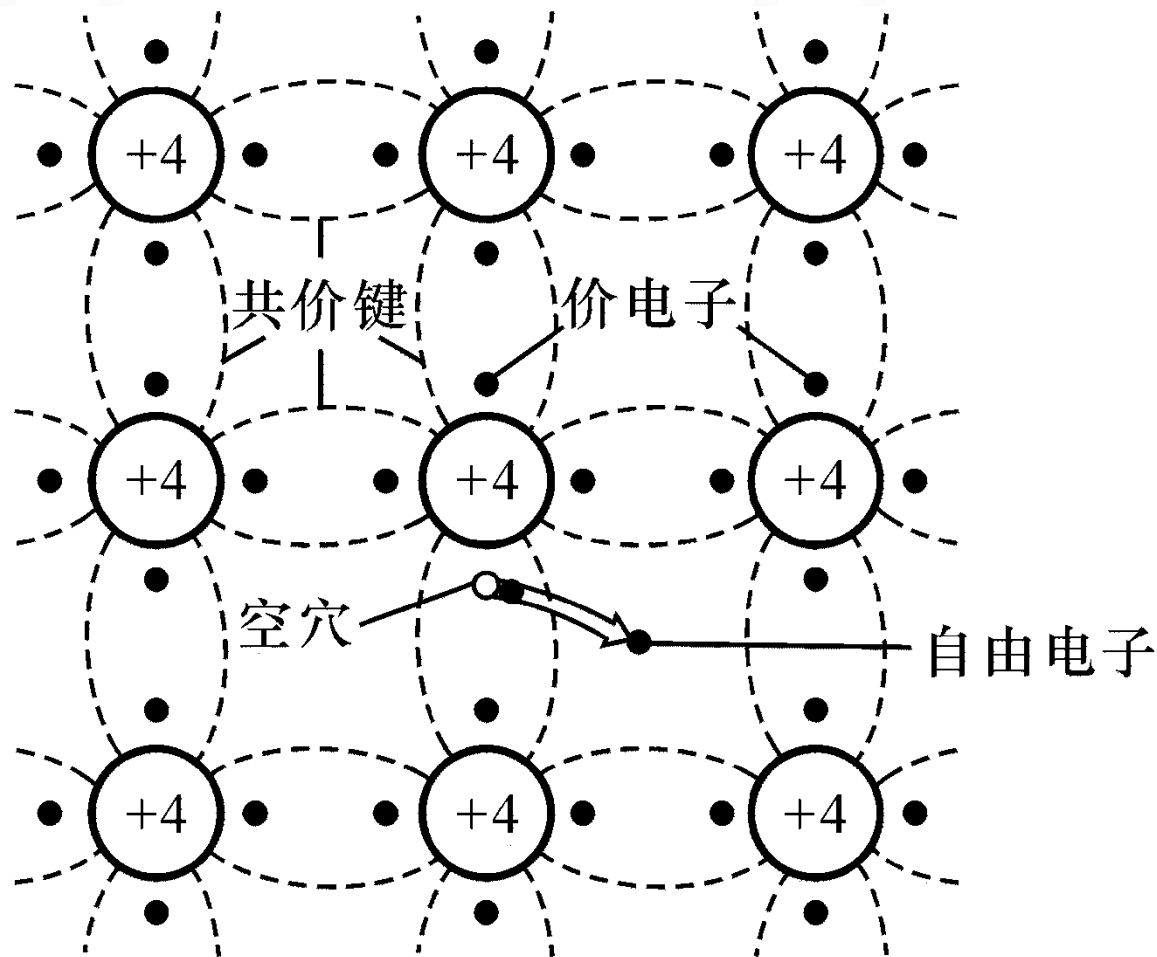


简化模型

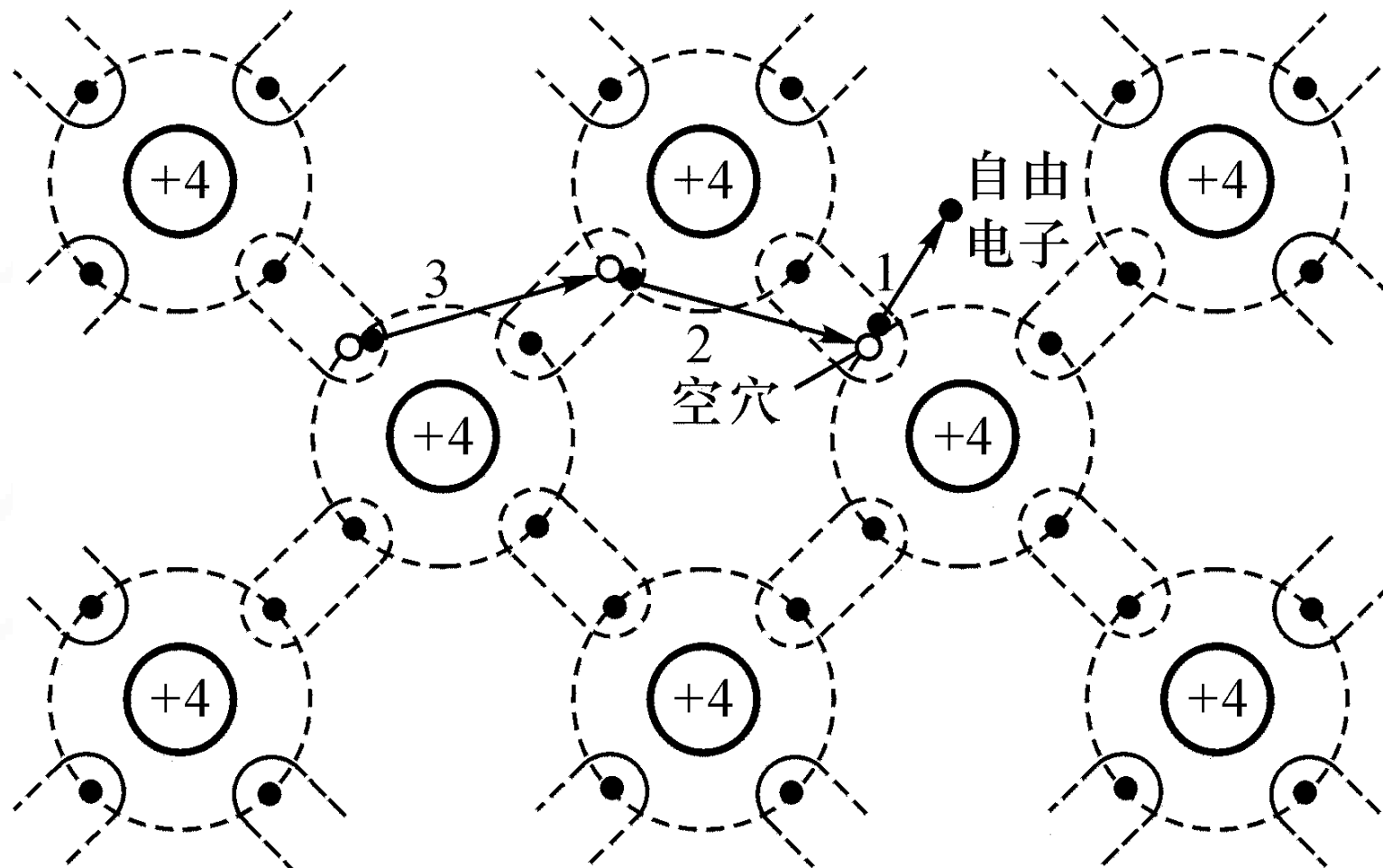


硅制成单晶后：

- 共价键
- 价电子
- 自由电子
- 空穴



自由电子和空穴总是成对出现，称为**电子空穴对**。  
电子空穴对的产生称为**本征激发**（**热激发**）。



- 空穴的移动
- 复合
- 3万亿分之一

在一定温度下，电子空穴对的热激发与复合达到动态平衡，电子空穴对维持一定的浓度。

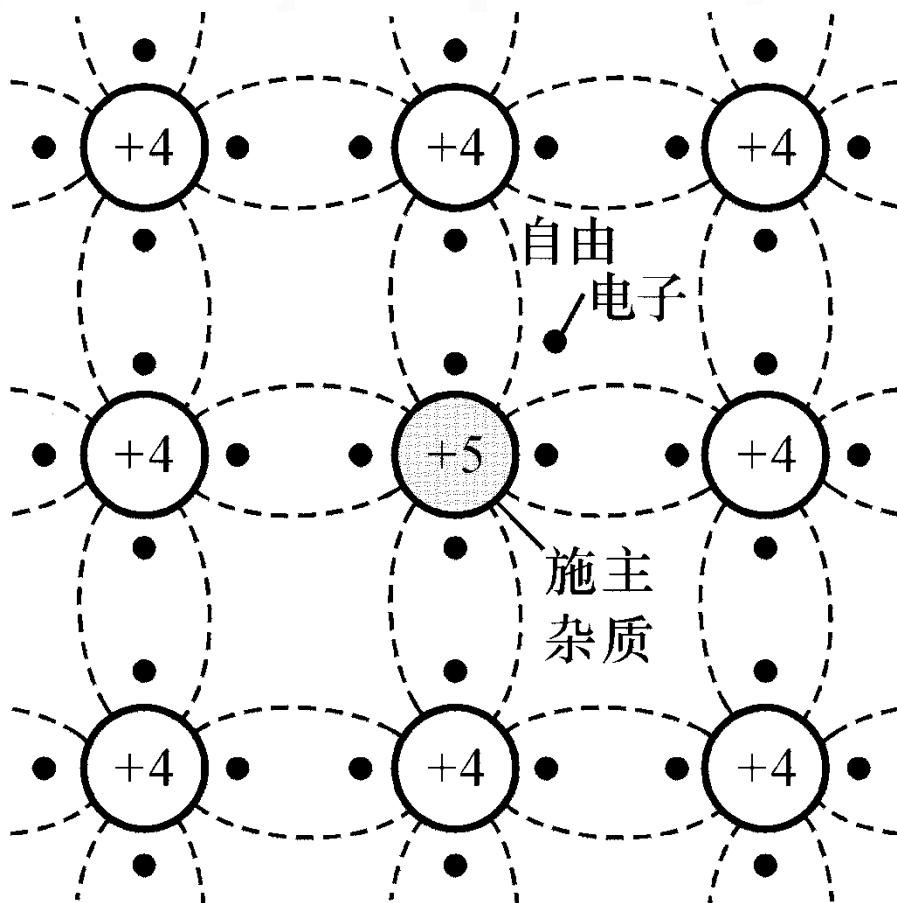
## 2、杂质半导体

为了**提高**半导体的**导电能力**，掺入某些微量的元素作为杂质，称为杂质半导体。

### (1) N型半导体

掺入磷、砷等五价元素。

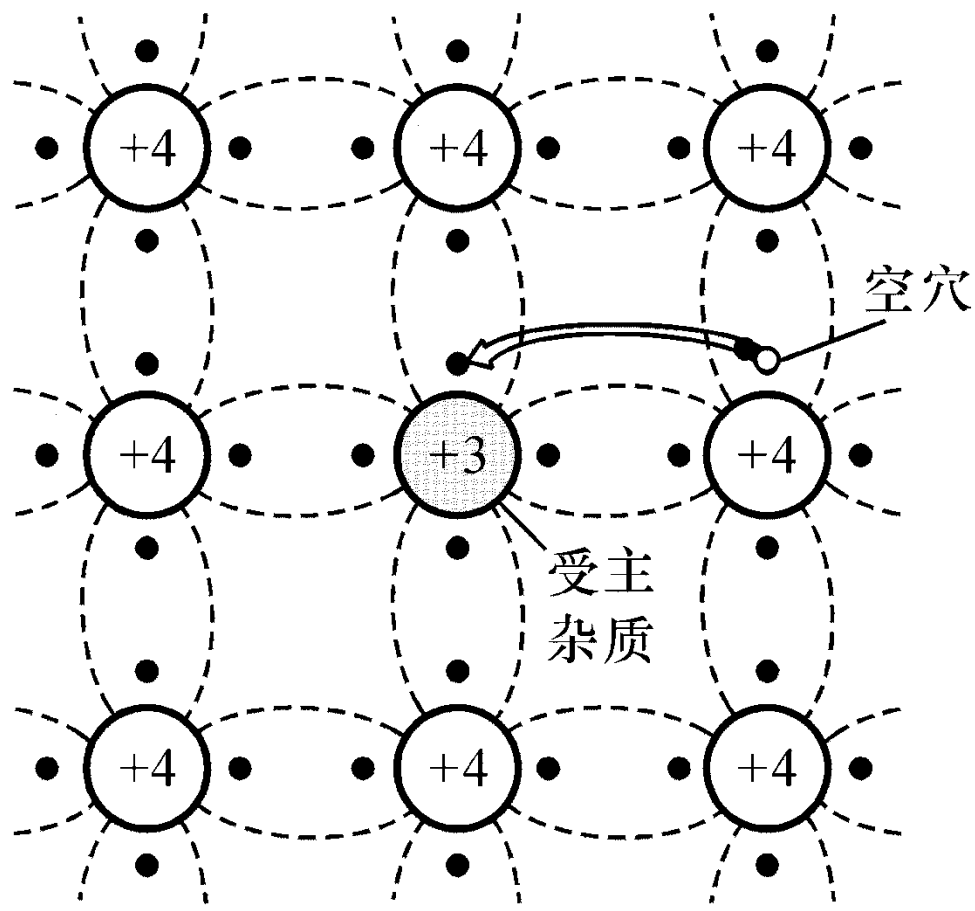
多余的价电子成为**自由电子**，且**浓度远远超过电子空穴对**。  
自由电子称为**多子**；  
空穴称为**少子**。



## (2) P型半导体

掺入硼、镓等三价元素。

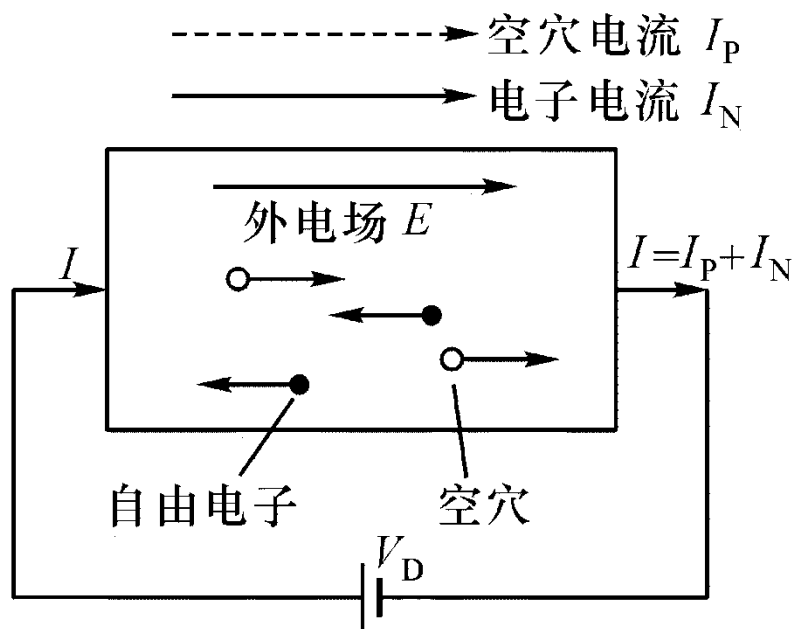
这种半导体以空穴导电为主，称为P型半导体。空穴为多子；自由电子为少子。



杂质半导体中，多子浓度由杂质的含量决定，少子的浓度主要由温度决定。

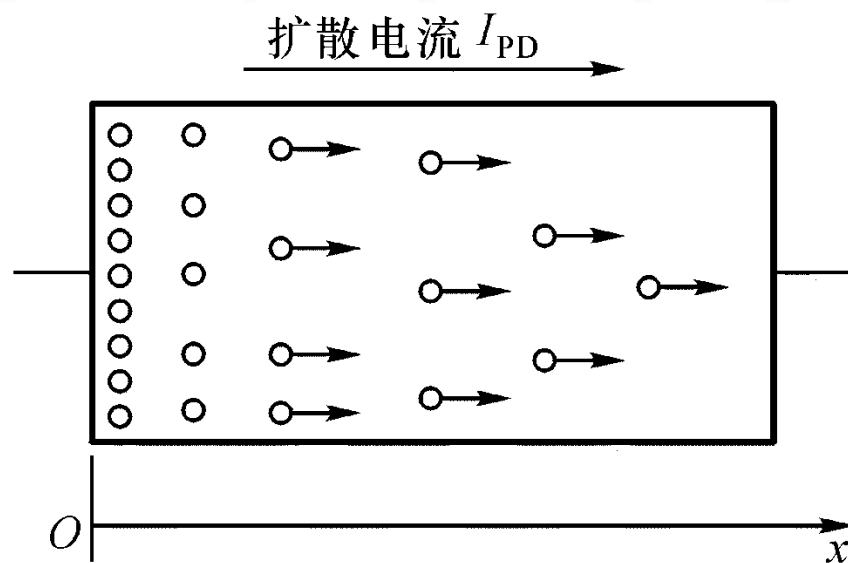
### 3、半导体中载流子的运动

#### ■ 漂移运动



在电场作用下的定向运动。自由电子与空穴产生的电流**方向一致**。

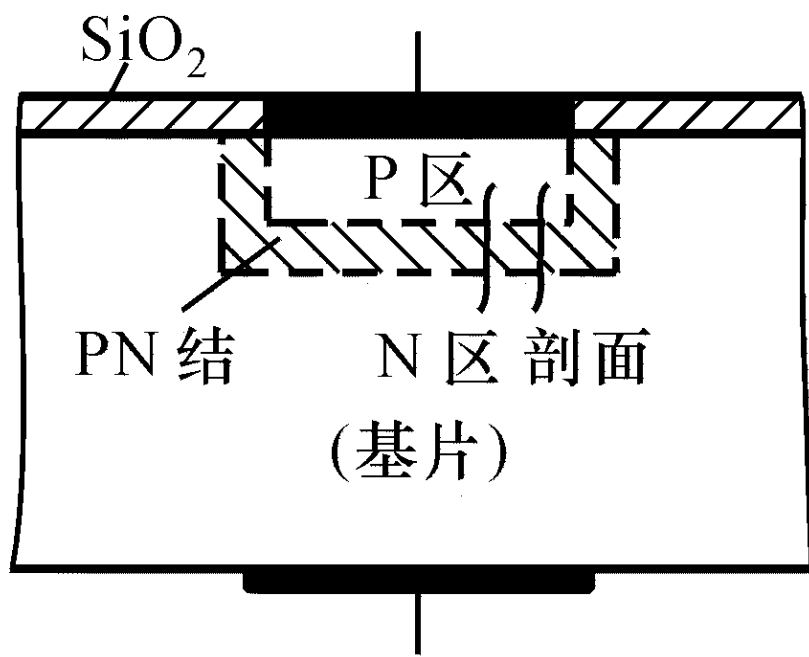
#### ■ 扩散运动



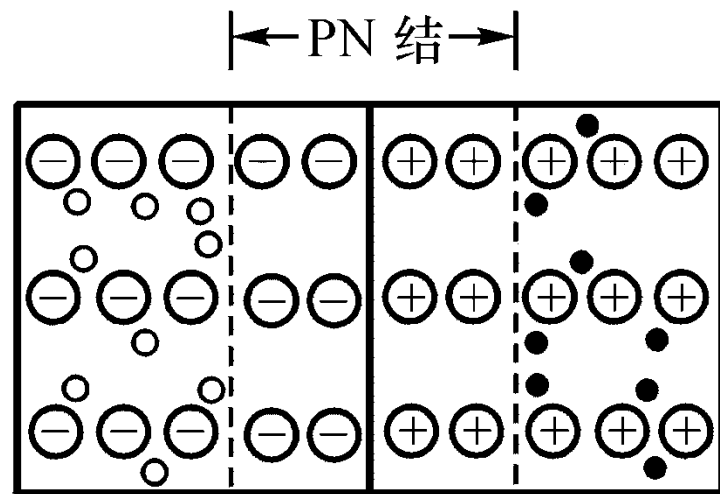
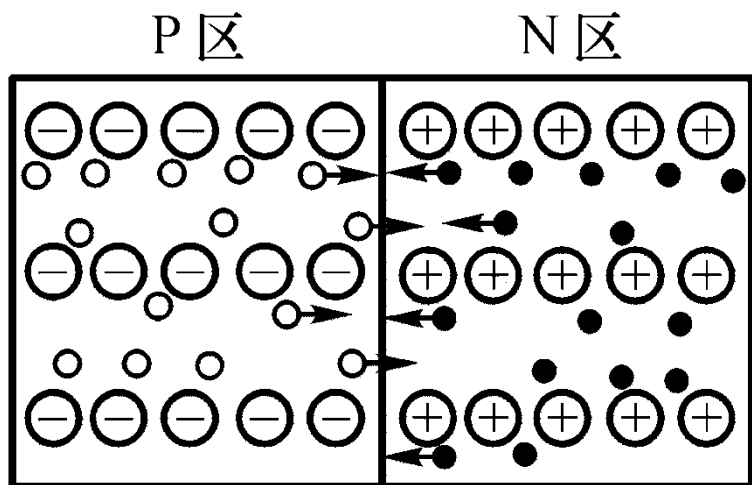
载流子由浓度高的区域向浓度低的区域扩散。

## 4、PN结的形成

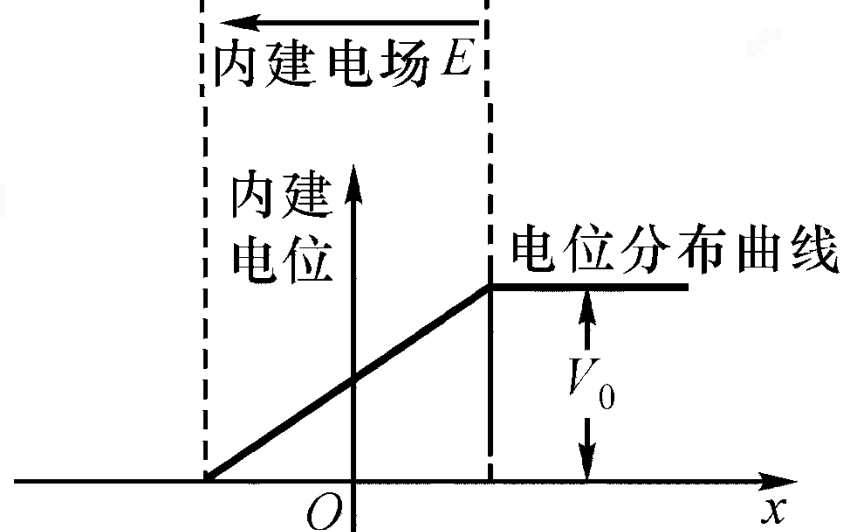
在N型半导体的基片上，采用平面扩散法等工艺，掺入三价元素，使之形成P型区，则在P区和N区之间的交界面处将形成一个很薄的空间电荷层，称为PN结。PN结的典型厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 。







P区空穴(多子)向N区扩散,  
留下不能移动的负离子;  
N区电子(多子)向P区扩散,  
留下不能移动的正离子;  
正负离子形成空间电荷层。

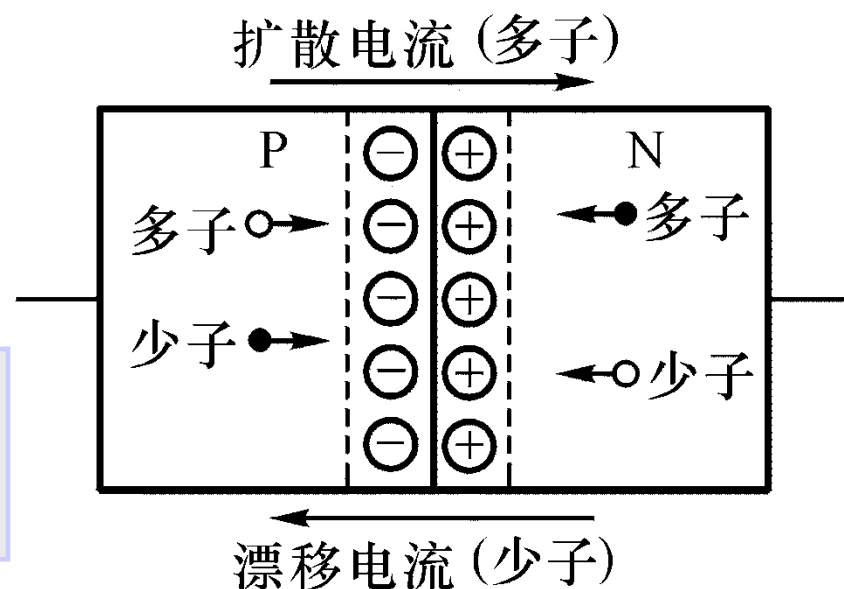


内电场是多子的扩散运动引起的。

## ☆ 内电场的影响

- 阻碍多子的扩散运动
- 促进少子的漂移运动

多子扩散运动使PN结变厚  
少子漂移运动使PN结变薄



没有外加电压时，多子扩散电流与少子漂移电流达到**动态平衡**。

[名称]：空间电荷层、势垒区、阻挡层、高阻区

阻挡层：强调对多子扩散运动的阻挡作用

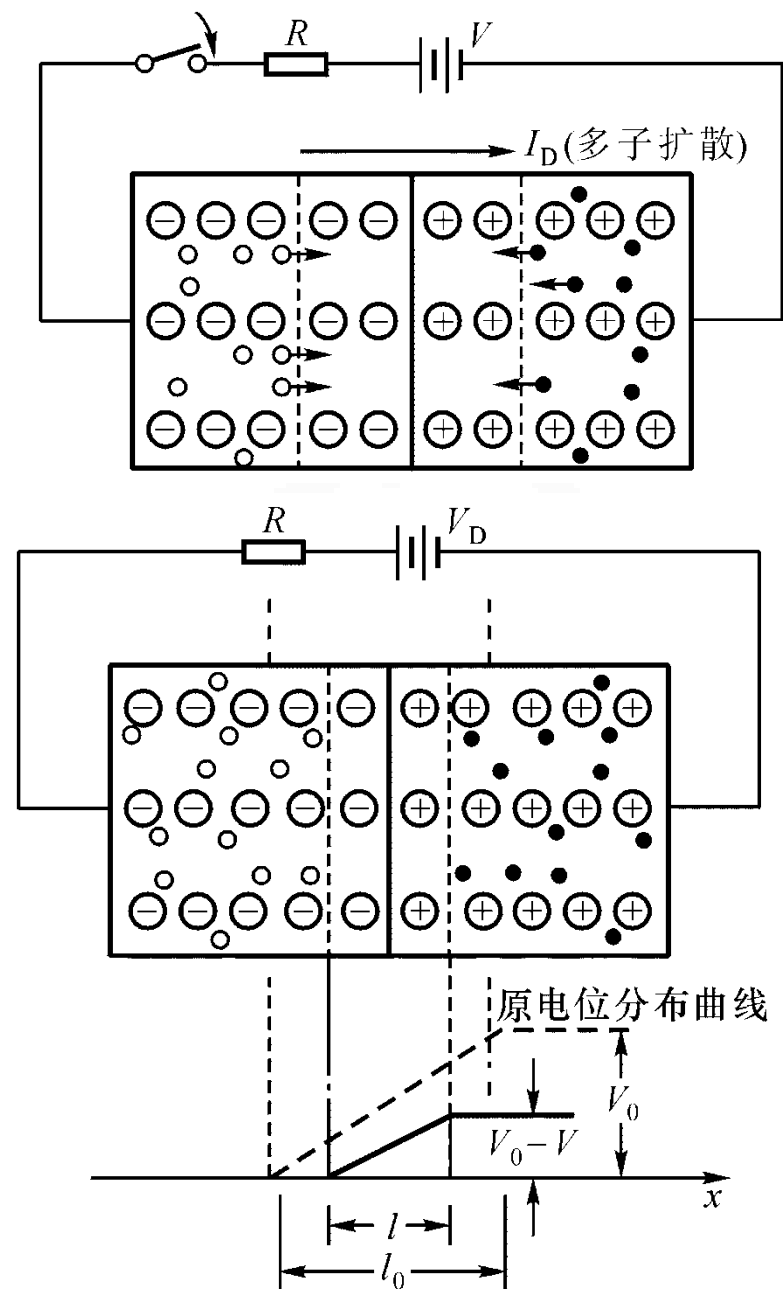
耗尽层：强调PN结内的载流子浓度减到最小

## 5、PN结的单向导电性

### ✧ 正偏：P(+) N(-)

- 外加电场与PN结内电场方向相反
- N区电子进入空间电荷层，使PN结厚度变薄
- 多子的扩散电流大大增加
- 少子的漂移电流远远小于扩散电流

正向电流近似为多子的扩散电流。



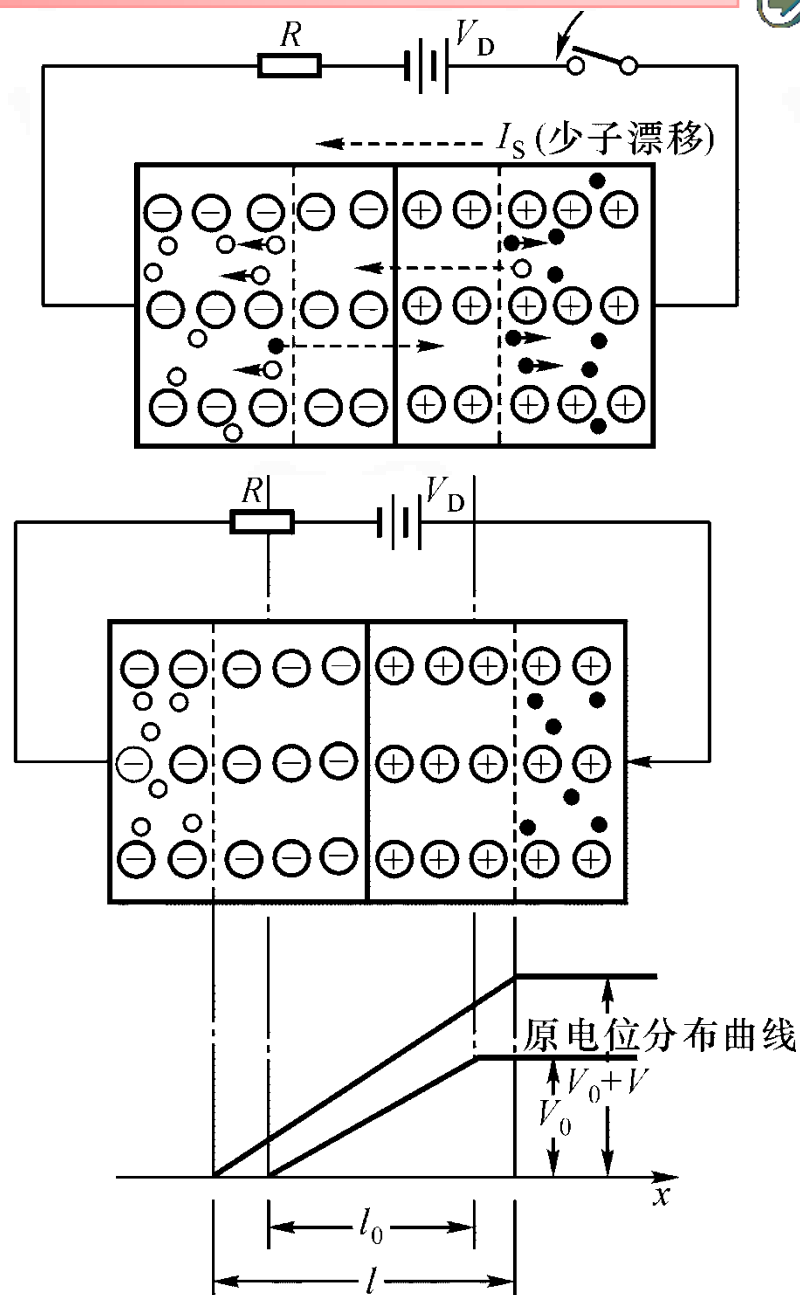
## ☆ 反偏：P(－) N(＋)

- 外电场与内电场方向一致
- 多数载流子离开PN结，使空间电荷层厚度变厚。
- 多子的扩散电流大大减小
- 少子的漂移电流占优势

反向电流近似为少子的漂移电流。

少子浓度很小，因此反向电流远远小于正向电流；

少子浓度与外加电压无关，故称反向饱和电流。

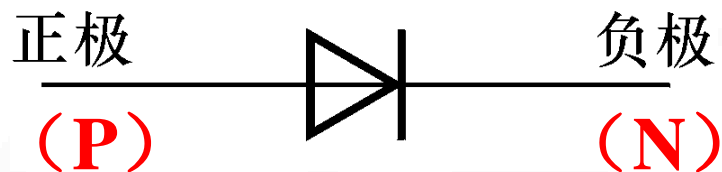




## 二、二极管特性参数与电路模型

✧ 二极管由一个PN结，加相应的电极引线和管壳封装而成。

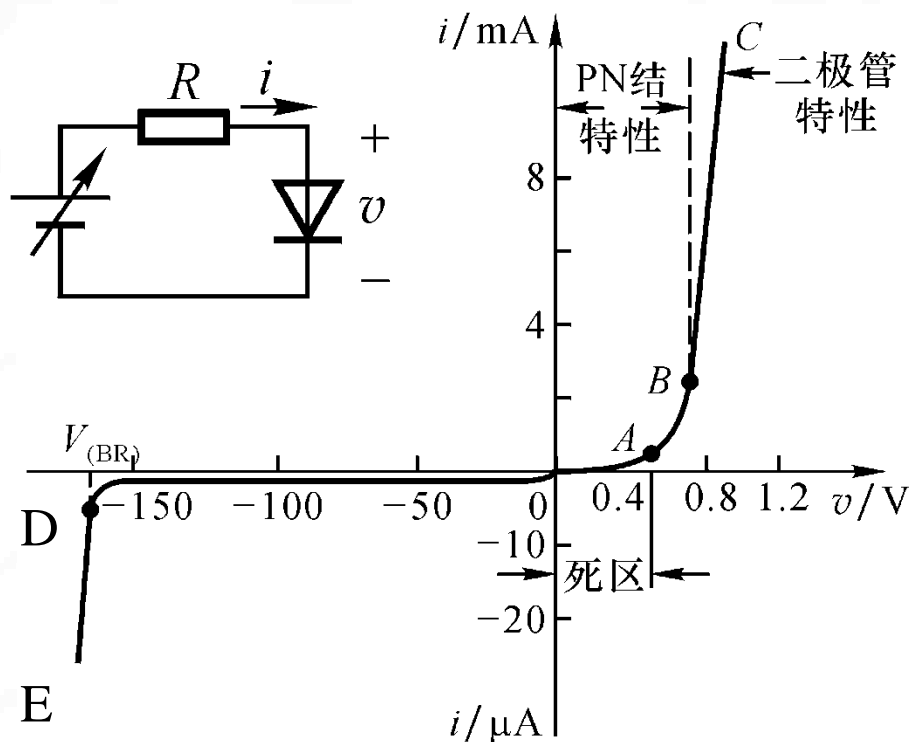
✧ 电路符号：



✧ 空心三角形箭头表示实际电流方向：电流从P流向N。

✧ 按结构分类：点接触型、面接触型、平面型；  
按材料分类：锗二极管、硅二极管。

## ➤ 二极管的伏安特性



OA: 死区

开启电压:  $V_{th}$

AB: 近似指数规律

BC: 近似恒压源

导通电压:  $V_{on}$

OD: 近似恒流源

反向电流:  $I_R$

DE: 反向击穿特性

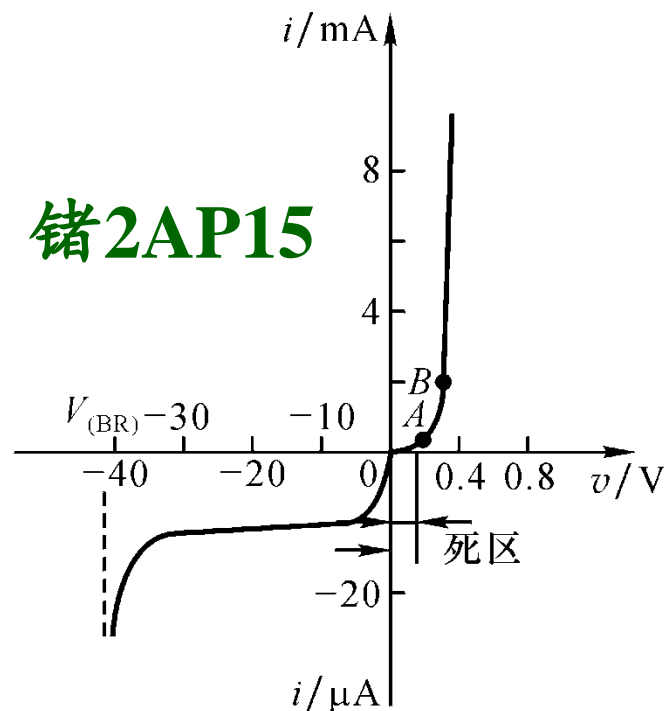
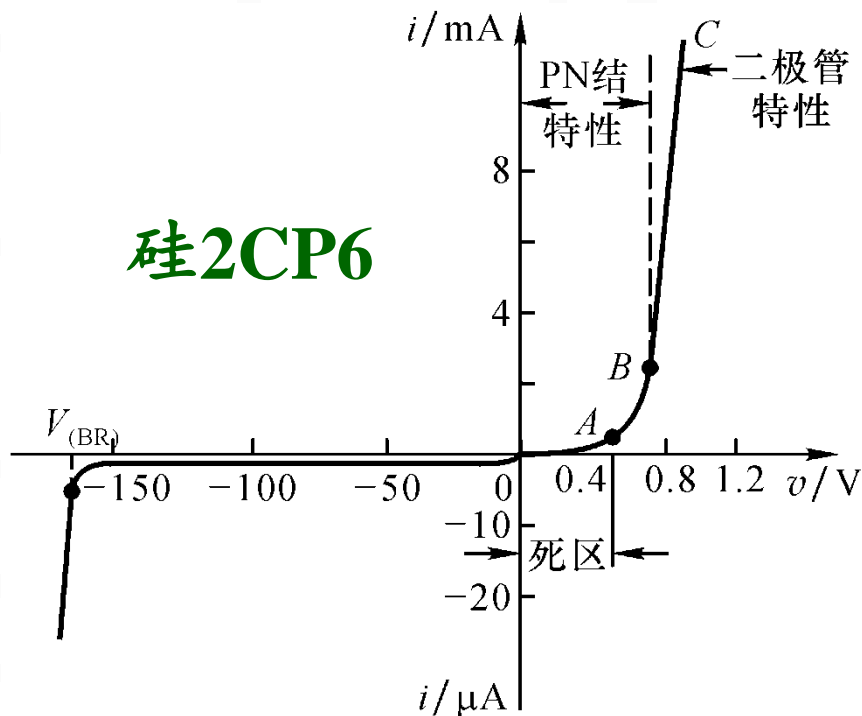
击穿电压:  $V_{(BR)}$

$$i = I_S (e^{v/V_T} - 1)$$

$I_S$ : 反向饱和电流  
 $V_T$ : 电压当量, 室温下  $V_T \approx 26mV$



## ☆ 硅二极管与锗二极管的比较



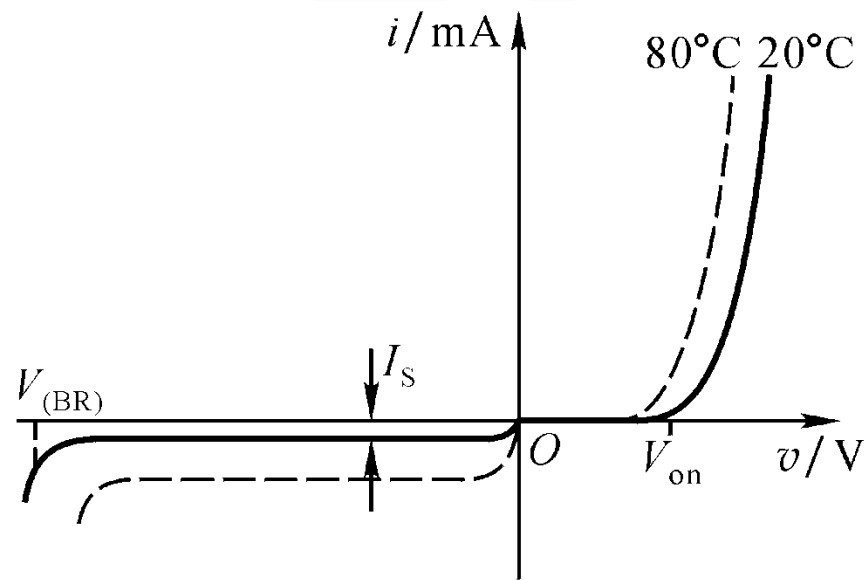
	硅二极管	锗二极管
开启电压 $V_{th}$	<b>0.5V</b>	<b>0.1V</b>
导通电压 $V_{on}$	0.6~0.8V(取 <b>0.7V</b> )	0.2~0.3V(取 <b>0.3V</b> )
反向电流 $I_R$	较小(nA 级)	较大( $\mu\text{A}$ 级)
击穿电压 $V_{BR}$	较大	较小

## ➤ 二极管的温度特性

✧ 温度对二极管的性能有较大的影响。温度升高时，反向饱和电流 $I_S$ 将呈指数规律增大，实验证明：温度每升高 $10^\circ\text{C}$ ， $I_S$ 约增加1倍。正向电流也增大。

✧ 温度升高时，正向电流也将增大，相当于正向偏压 $V_D$ 减小（对于同一正向电流）。温度每升高 $10^\circ\text{C}$ ，正向电压减小 $25\text{mV}$ 。

$$\frac{\Delta V_D}{\Delta T} = -2.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$



PN结正向电压具有负温度系数。



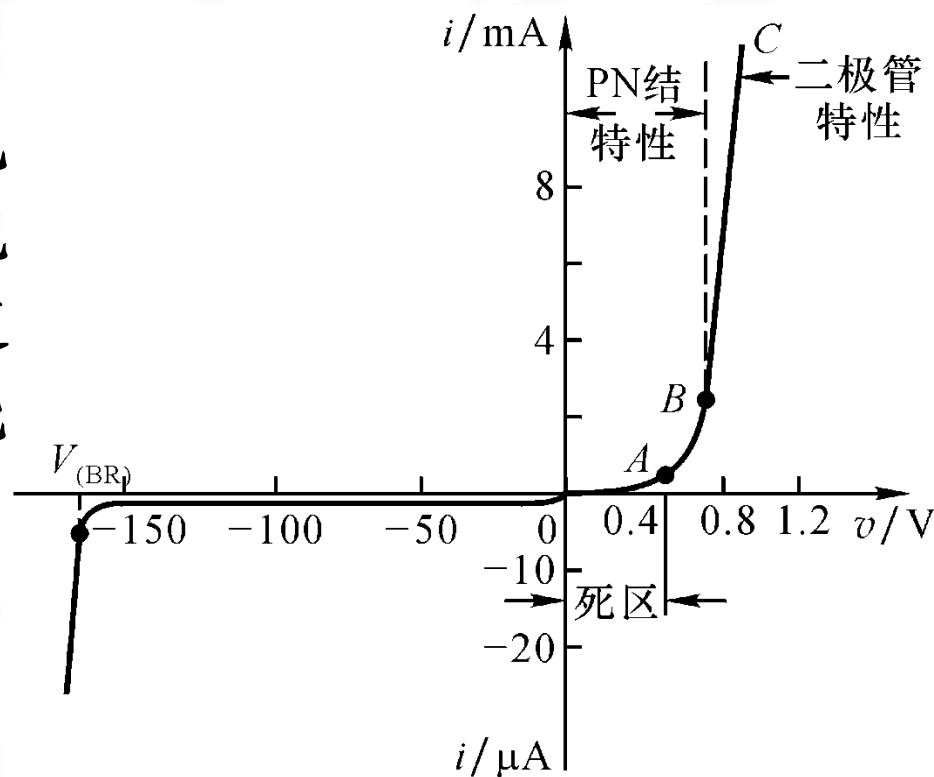
## ➤ 二极管的主要参数

### ✧ 最大整流电流 $I_F$

是二极管**长期运行时**允许通过的最大正向电流平均值。整流电流超过此值时，二极管将被烧坏。

### ✧ 反向击穿电压 $V_{(BR)}$

当反向电压超过  $V_{(BR)}$  时，反向电流剧增，二极管的单向导电性能被破坏，甚至引起二极管损坏。



### ✧ 反向电流 $I_R$

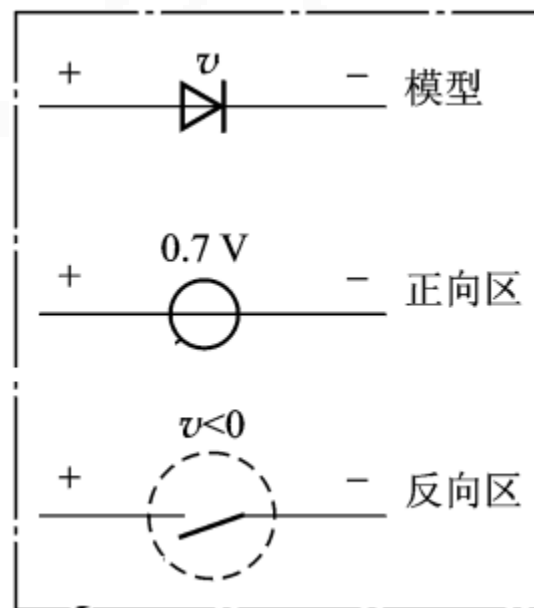
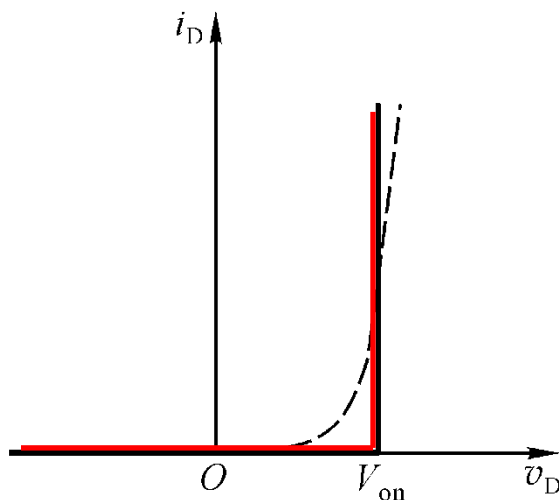
反向电流越小，管子的单向导电性越好。



## ➤ 二极管的电路模型

二极管是一种非线性器件，根据不同应用场合，需要对二极管的非线性进行**线性化**处理，以建立其相应的模型。最简单的是恒压降模型和理想二极管模型。

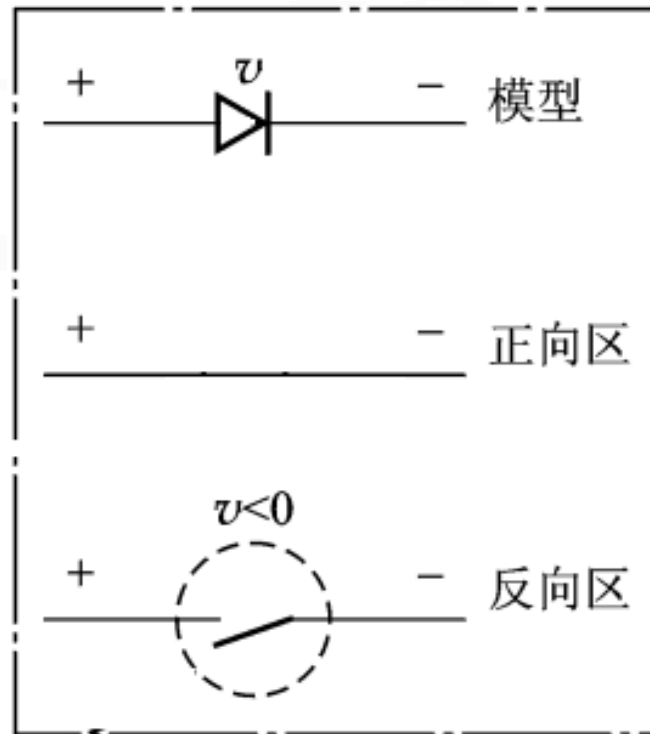
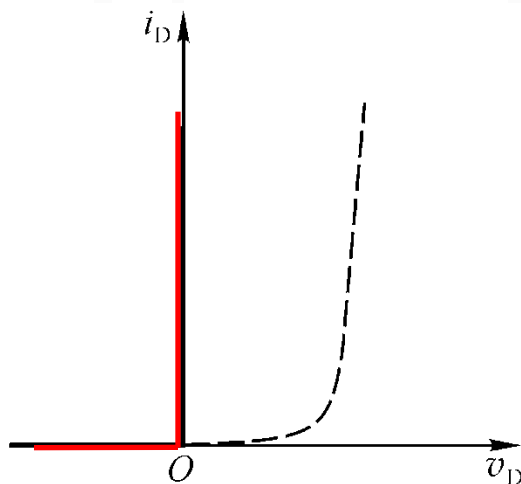
### ✧ 恒压降模型





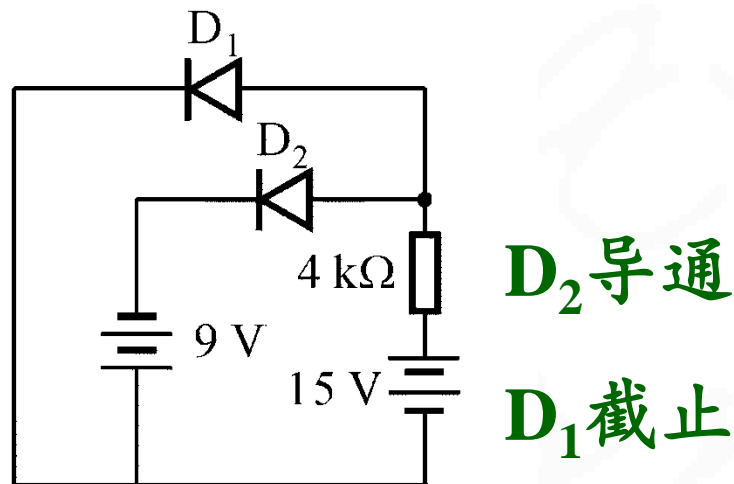
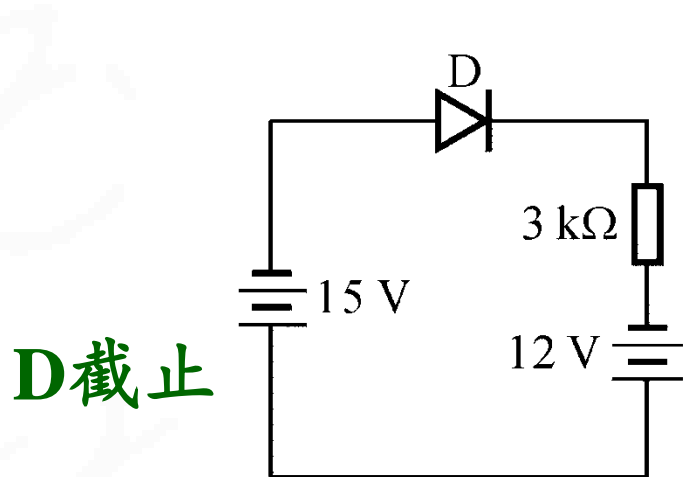
## ◇ 理想二极管模型

当电路中其他电压远大于二极管正向导通电压 ( $V_D=0.7V$ ) 时,  $0.7V$ 可忽略, 这时二极管称为理想二极管。





# 【例1】判断图中二极管是导通还是截止？



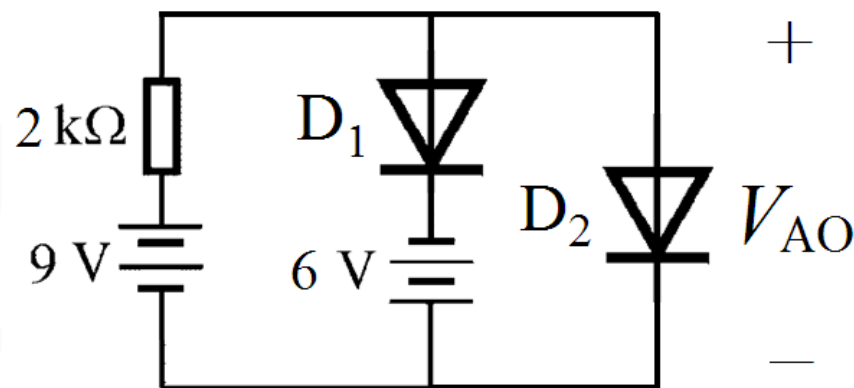
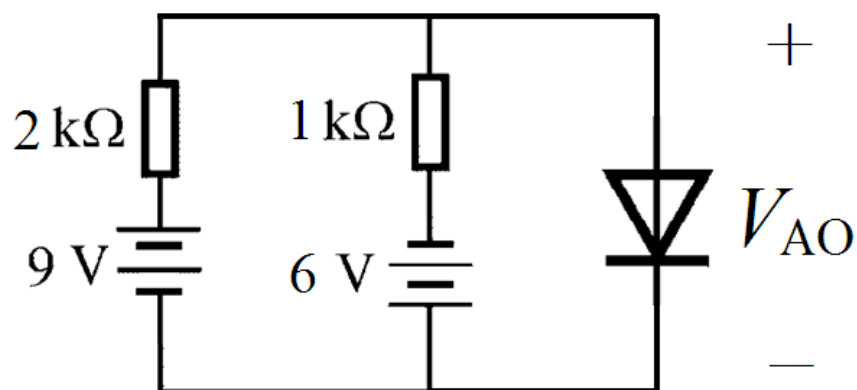
【解】首先假设二极管断开，求得二极管两端所承受的电压。若正向电压大于开启电压，则二极管处于正偏导通，导通电压 $\approx 0.7\text{V}$ 。若正向电压为负或小于开启电压，则二极管截止。

若电路中有多个二极管，通常承受正向电压较大者优先导通，然后再判断其余二极管。



## 【例2】 练习

设二极管导通电压为 $0.7\text{V}$ ，判断图中二极管是导通还是截止？并求出 $V_{AO}$ 。



【解】 **D截止**

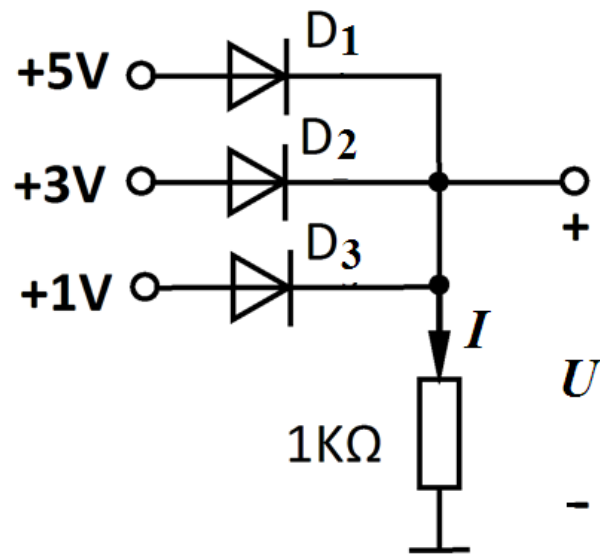
$$V_{AO} = -1\text{ V}$$

**D<sub>1</sub>导通，D<sub>2</sub>截止**

$$V_{AO} = -5.3\text{ V}$$

## 【例3】

求图示电路中 $U$ 和 $I$ 的值。



## 【解】

$D_1$ 导通,  $D_2$ 、 $D_3$ 截止。

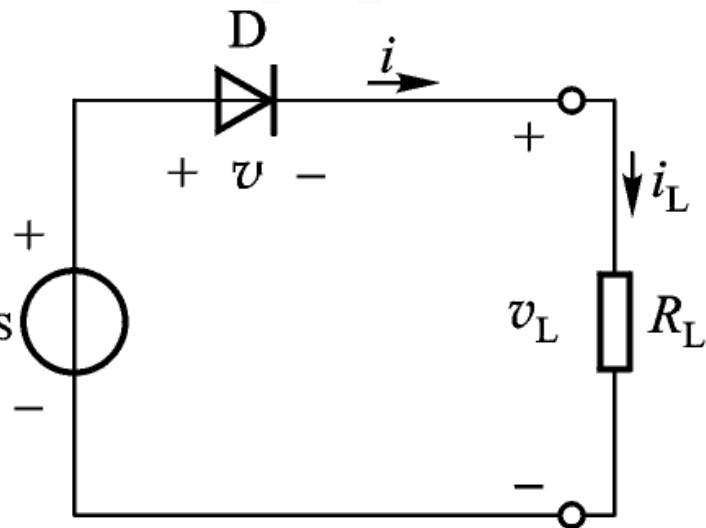
若采用理想二极管模型:  $U=5\text{ V}$ ,  $I=5\text{ mA}$

若采用恒压降模型:  $U=4.3\text{ V}$ ,  $I=4.3\text{ mA}$

当 $U \gg 0.7\text{ V}$ 时, 可采用理想二极管模型。

## 【例4】

图示电路为硅二极管半波整流电路， $R_L=10\Omega$ ，电源为220V交流电源  $v_S = 220\sqrt{2}\sin\omega t$  V， $v_S$  画出负载电压 $v_L$ 和负载电流 $i_L$ 的波形。



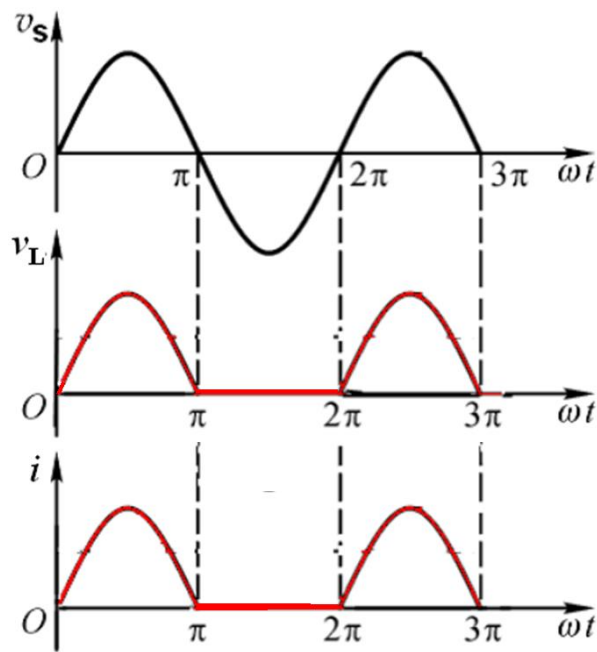
【解】 采用理想二极管模型。

- 正半周， $D$ 导通

$$v_L = v_S \quad i_L = v_S / R_L$$

- 负半周， $D$ 截止

$$v_L = 0 \quad i_L = 0$$



### 三、其它类型二极管（特种二极管）

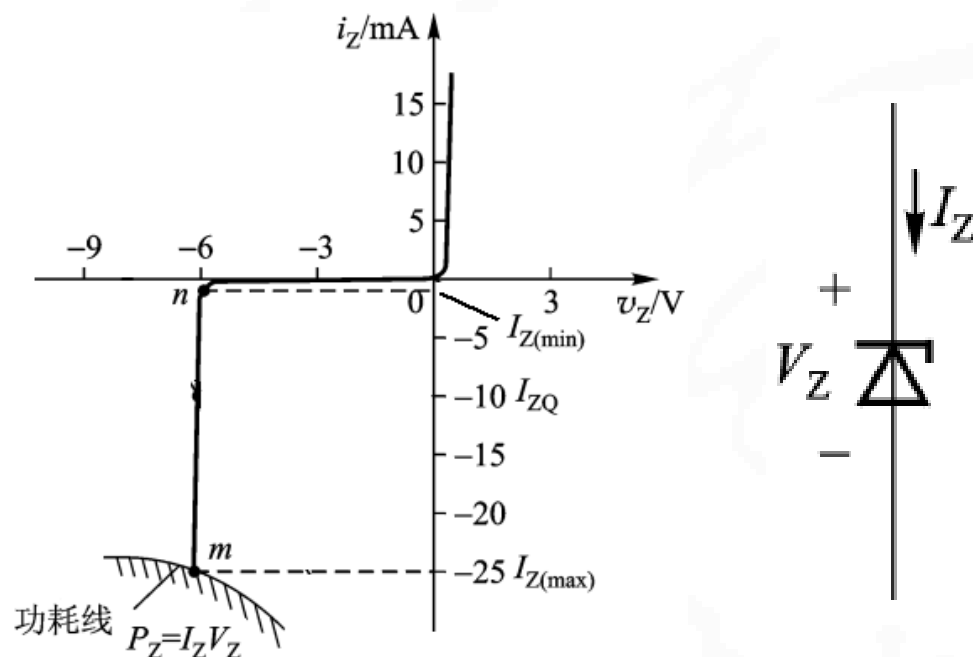
#### 1、稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的二极管，是利用二极管的反向击穿特性，在制造时对反向击穿电压的大小进行控制，从而生产出不同稳定电压 $V_Z$ 的稳压二极管。

##### ➤ 伏安特性

✧ 工作在反向击穿特性上

✧ 注意稳压电压、稳压电流的方向





## ➤ 稳压管的主要参数

### ✧ 稳定电压 $V_Z$

稳压二极管正常工作时的两端电压。

### ✧ 最大允许耗散功率 $P_{Z(max)}$

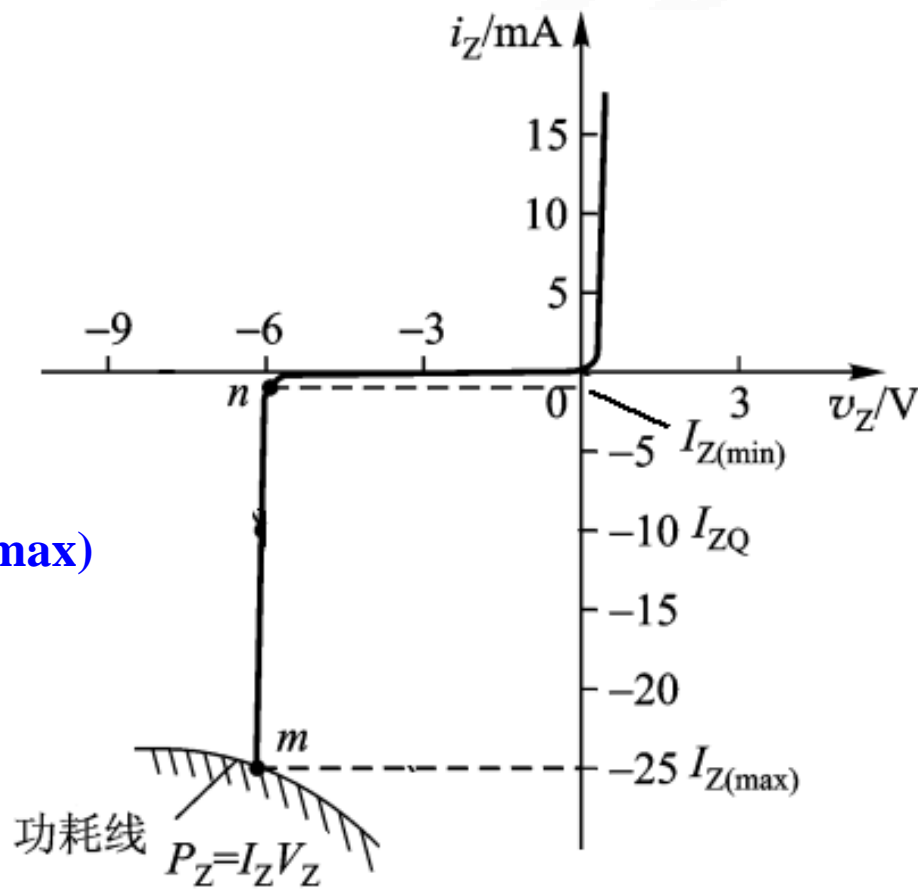
超过这一限值，稳压管会因过热而烧毁。

### ✧ 最小稳定电流 $I_{Z(min)}$

反向击穿区的起始电流， $I_{Z(min)} \approx 0$ 。

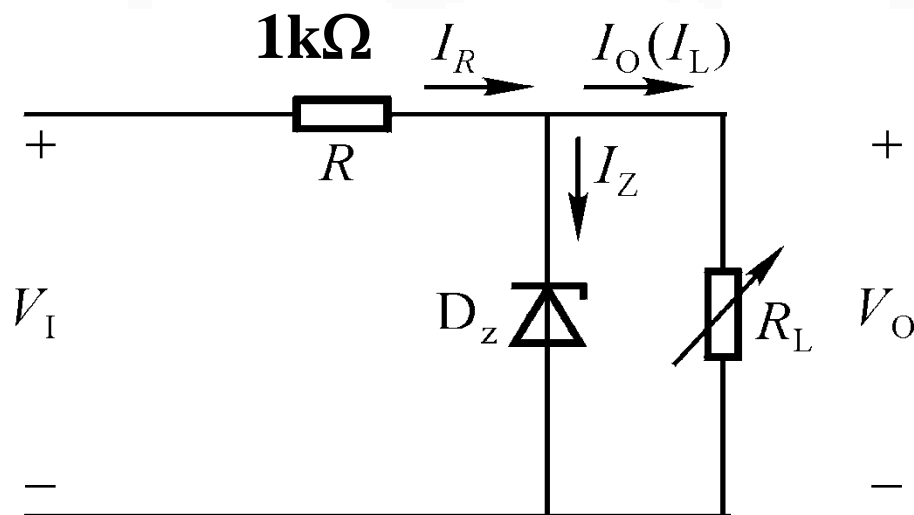
### ✧ 最大稳定电流 $I_{Z(max)}$

$$I_{Z(max)} = P_{Z(max)} / V_Z$$



## 【例5】稳压管典型电路

已知  $V_I = 12\text{ V}$ ,  $V_Z = 6\text{ V}$ 。当  $R_L = 2\text{ k}\Omega$  时, 求负载电流  $I_L$ 、稳压管电流  $I_Z$ 。



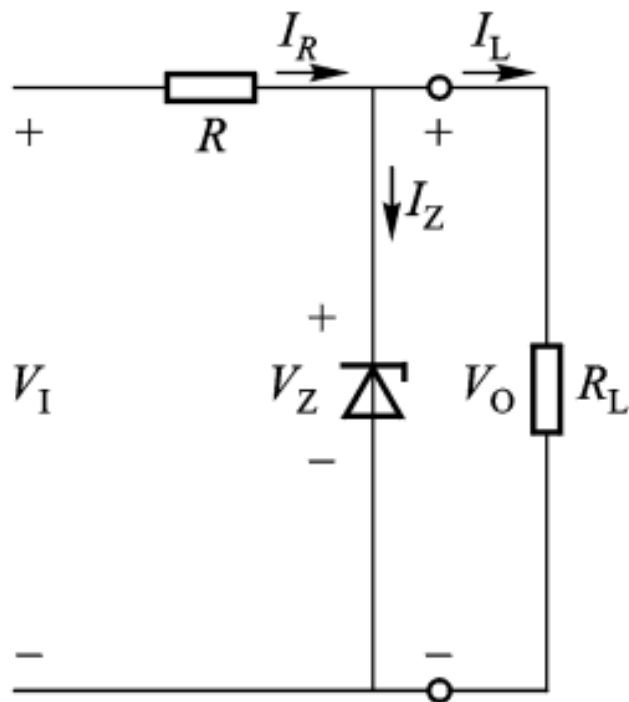
$$\text{【解】} \quad I_R = \frac{V_I - V_O}{R} = 6\text{ mA} \qquad I_L = \frac{V_O}{R_L} = 3\text{ mA}$$

$$I_Z = I_R - I_L = 3\text{ mA}$$



## 【例6】

设稳压管的稳定电压  $V_Z=6\text{ V}$ ，正常工作时的稳定电流  $I_Z=10\text{ mA}$ ，稳压管允许功耗  $P_{Z(\max)}=150\text{ mW}$ 。试分析当  $V_I=12\text{ V}$ ， $R_L=600\ \Omega$  时，限流电阻  $R$  应选择多大？并分析这一阻值能否保证电路安全。



稳压管典型电路

【解】

$$I_L = \frac{6\text{ V}}{0.6\text{ k}\Omega} = 10\text{ mA}$$

$$I_R = I_Z + I_L = 20\text{ mA}$$

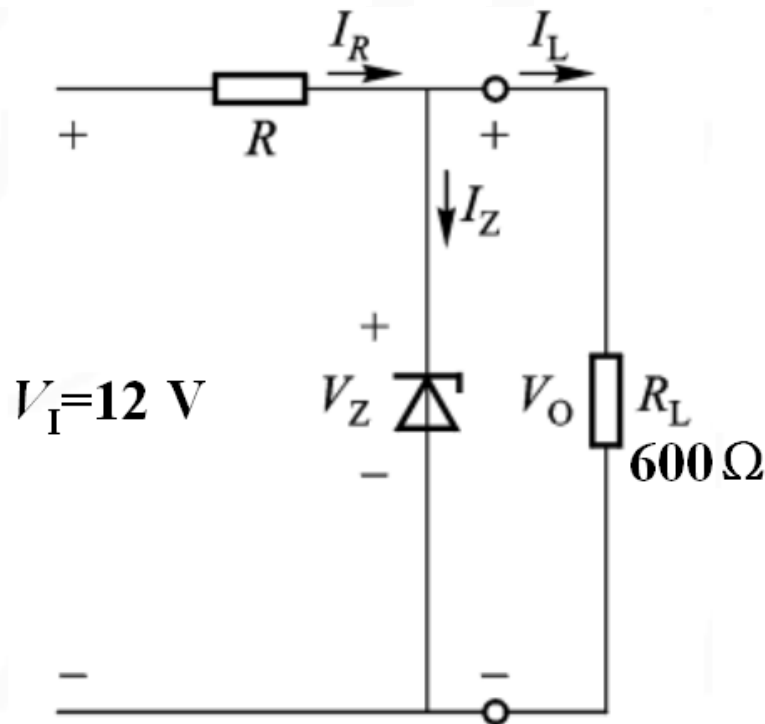
$$R = \frac{V_I - V_Z}{I_R} = \frac{12 - 6}{20} = 300\ \Omega$$

✧ 稳压管是否会超过  $I_{Z(\max)}$

$$I_{Z(\max)} = \frac{P_{Z(\max)}}{V_Z} = \frac{150\text{ mW}}{6\text{ V}} = 25\text{ mA}$$

当负载开路时，稳压管电流最大：

$$I_Z = I_R = \frac{V_I - V_Z}{R} = 20\text{ mA} < I_{Z(\max)}$$





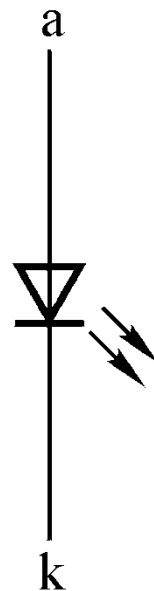
## ➤ 稳压管的小信号模型

考虑小信号时，稳压管等效为一个动态电阻 $r_z$ 。  
以后再讲。



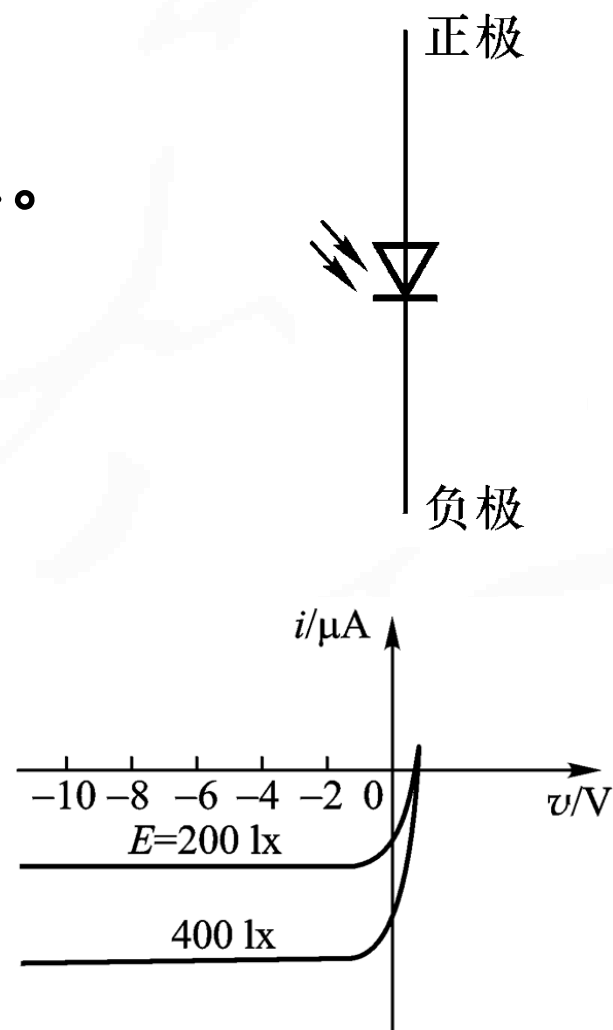
## 2、发光二极管

- ✧ 电致发光器件，将电信号转换成光信号。
- ✧ 原理：由磷砷化镓（GaAsP）、磷化镓（GaP）等半导体制成的 PN 结正偏工作时，多子大量复合，释放出能量，其中一部分以光能的形式体现。
- ✧ 光的波长（颜色）与材料有关。
- ✧ 亮度与正向电流成正比，一般需要几个毫安以上。
- ✧ 优点：功耗小，易于和集成电路匹配，驱动简单，响应时间快（点亮或熄灭 ns 级），寿命长，耐冲击等。



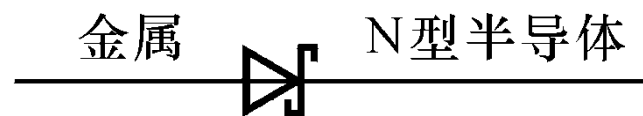
### 3、光电二极管

- ✧ 管壳有接收光照的透镜窗口。
- ✧ 光电二极管的照度与电流成正比。
- ✧ 用于信号检测、光电传感器等。
- ✧ 正常应用时：光电二极管工作在反向偏置状态。无光照时只有很小的反向饱和电流  $I_S$ （暗电流）；有光照射时，光电二极管受光激发，产生大量电子-空穴对，形成较大的光生电流，且随光照强度的增加而增大。





## 4、肖特基二极管



- ✧ 显著特点：导通电压很低(约0.4V)；导通时存贮的非平衡少数载流子数量少，关断时间很短，工作频率高。
- ✧ 用在高速数字电路中。





## 本节重点提示:

- ✧ 掌握二极管的单向导电性、伏安特性和等效模型。
- ✧ 会判断二极管在电路中是否导通。
- ✧ 会分析简单的二极管电路。
- ✧ 掌握稳压二极管的稳压原理、及典型稳压电路。
- ✧ PN结、二极管参数、特种二极管等内容只需了解即可。



# 作业：

题3.2

题3.10

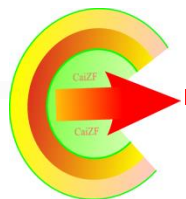
题3.3

题3.7

提示：题3.2(e)书后答案 $U_{AO} \approx 50\text{mV}$ 有误，应为  
 $U_{AO} \approx 40\text{mV}$ 。



Thank you for your attention



蔡忠法

Ver3.51

浙江大学电工电子教学中心

版权所有©

2020年